

Projet de Physique P6
STPI/P6/2013 – 28

Ailettes thermiques



Etudiants :

Christophe BOUVIER **Estelle GERVAIS**
Baptiste O'JEANSON **Antoine SALAÜN**

Enseignant-responsable du projet :
Diane DUVAL

Date de remise du rapport : **17/06*/2013***

Référence du projet : ***STPI/P6/2012 – 28***

Intitulé du projet : ***Ailettes thermiques***

Type de projet : ***bibliographie, expérimentations, modélisation***

Objectifs du projet :

- ***Comprendre le rôle des ailettes thermiques.***
- ***Étudier les phénomènes de conduction et de convection pour une ailette thermique.***
- ***Modéliser l'évolution de la température dans une ailette thermique en régime permanent.***
- ***Tester l'influence des caractéristiques d'une ailette thermique sur sa propre efficacité.***
- ***Confronter résultats expérimentaux et modélisation théorique.***

Mots-clefs du projet :

- ***Transferts thermiques***
- ***Convection***
- ***Conduction***
- ***Régime permanent***

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION

Au cours de cette seconde année passée à l'INSA de Rouen, nous avons été amenés à choisir un projet parmi une liste conséquente de sujets portant sur un nombre élevé de domaines scientifiques, allant de la chimie à l'optique en passant par la mécanique. Un point rend cette enseignement différent des autres : nous devons travailler en groupe, nous organiser entre étudiants afin de découvrir ou approfondir un sujet précis qui nous intéresse. En effet, si nous avons choisi de traiter un sujet concernant les ailettes thermiques, c'est afin d'en apprendre plus sur la thermodynamique, d'une manière différente de celle présentée pendant les cours de P1 et de T1, plus connectée à la réalité de par son côté expérimental. Nous avons voulu nous intéresser à cette notion essentielle de chaleur, facilement observable mais à la fois complexe, afin bien sûr d'améliorer nos connaissances dans ce domaine mais aussi pour nous préparer à la suite de notre cursus d'ingénieurs, particulièrement pour ceux d'entre nous qui se dirigent vers le département énergétique et propulsion.

Les ailettes thermiques sont présentes partout dans notre quotidien, sans même que l'on s'en rende compte. Dans une société où l'énergie détient une place centrale, comment manipuler celle-ci est devenu une problématique importante. Nous savions déjà que les ailettes thermiques permettaient par exemple d'évacuer la chaleur d'un système électronique. Cette étude doit nous permettre d'en apprendre plus sur leur rôle, de comprendre la manière dont fonctionnent celles-ci, et à terme d'essayer de les modéliser.

Dans ce but, nous allons tout d'abord nous intéresser à l'évolution de la notion de chaleur au cours de l'histoire, avant de décrire plus précisément ce qu'est une ailette thermique et quelles sont ses applications concrètes. Nous expliquerons ensuite la manière dont nous nous sommes organisés pour mener nos recherches à bien, avant d'exposer les travaux expérimentaux et théoriques que nous avons effectués. Nous finirons par analyser les résultats obtenus, et par tirer les enseignements apportés par ce projet.

2. GÉNÉRALITÉS

2.1. La chaleur au cours de l'histoire

Le feu a longtemps interrogé les physiciens et les chimistes du XVIIème et du XVIIIème siècle concernant ses caractéristiques physiques, à savoir le dégagement de chaleur mêlé à la lumière et aux flammes. Le point qui les a laissés le plus dubitatif reste ce que le feu dégage lors de la combustion d'un matériau.

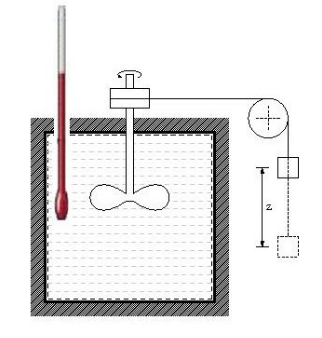
Au XVIIIème siècle, les chimistes de l'époque pensaient qu'au cœur de chaque matériau inflammable se trouvait une sorte de fluide. Ce fluide, nommé le phlogistique, serait incolore, inodore et impondérable (invisible physiquement). Cependant la présence de ce fluide se remarquerait lorsqu'un matériau brûlerait. En effet, les chimistes supposaient que la chaleur qui était dégagée, lors de la combustion du matériau, était ce fluide. Plus le fluide serait présent initialement dans le matériau (avant une combustion) et plus la quantité de chaleur qui s'en dégagerait serait importante et mieux le matériau brûlerait.

Un peu plus tard dans le siècle d'autres chimistes émirent d'autres théories sur la chaleur selon lesquelles : il s'agirait d'un fluide s'écoulant des corps chauds vers les corps froids.

Lavoisier (XIXème siècle), le révolutionnaire et initiateur de la chimie de notre temps, qui mit fin à l'alchimie se fourvoya également. En effet, il classa la chaleur avec des atomes tels que l'azote ou l'oxygène. Lui qui démontra que : lors d'une réaction chimique la masse totale des réactifs et des produits se conservait tout au long de la réaction, pensait notamment que la chaleur était un fluide. Cependant, grâce à cette loi de conservation, il posa les bases de la loi de conservation de l'énergie.

Un autre grand scientifique du XIXème siècle, Sadi Carnot (le physicien) établit les bases de la thermodynamique,à seulement 27 ans, dans son ouvrage (le seul de sa vie) intitulé *Réflexions sur la puissance motrice du feu et les machines propres à développer cette puissance* (1824). A l'intérieur de celui-ci, il développe le second principe de la thermodynamique à savoir que : quel que soit le système fermé, il existe une grandeur extensive appelée entropie dont la valeur S est une fonction des variables d'état et donnée par la formule $\Delta S = S^{r}_{t1\rightarrow t2} + S^{p}_{t1\rightarrow t2}$. « L'entropie d'un système caractérise son degré de désordre, cela permet de mesurer la dégradation de l'énergie d'un système ». (*Source Larousse universel en 2 volumes* dictionnaire encyclopédique)
La majeure partie de ses travaux a été consacrée aux machines thermiques, qui transformaient l'énergie thermique, produite lors de la combustion du charbon, en énergie mécanique.

James Prescott Joule (1818-1889), lui, a passé de longues heures à mettre en relation chaleur, électricité et travail mécanique. Pour ce faire, il a réalisé une expérience connue de nos jours :



Celle-ci consiste à accrocher un poids au bout d'une corde relié à une roue à aube immergée dans un récipient d'eau aux parois adiabatiques. Quand le poids tombe dans le vide la roue se met à tourner dans l'eau ce qui provoque une élévation de la température de l'eau.

Il en déduit que la chaleur est une énergie (car résultante d'un mouvement mécanique) et qu'elle est proportionnelle au travail fourni.

Ainsi il énonce le 1er principe de la thermodynamique, concernant la conservation de l'énergie, qui est le suivant : $\Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep = W_{1\rightarrow 2} + Q_{1\rightarrow 2}$

La chaleur n'est plus un fluide particulier ni une quantité que l'électricité ou les travaux mécaniques transportent mais bel et bien une énergie que l'on peut transformer en travaux mécaniques par exemple. L'énergie ne se crée pas mais se transforme.

2.2. Définition et applications des ailettes thermiques

Le rôle des ailettes thermiques est de favoriser l'échange de chaleur entre deux milieux, or le nombre de domaines mettant en jeu des échanges thermiques est impressionnant. Étudions le rôle précis des ailettes thermiques dans certains systèmes de notre vie quotidienne.

Application la plus connue, les systèmes de chauffage des particuliers mettent en jeu des systèmes d'ailettes thermiques afin de transmettre la chaleur issue d'une résistance (dans le cas du chauffage électrique), ou d'un fluide caloporteur (porteur de chaleur) en circulation, à l'air ambiant.



Ci-contre une résistance chauffante composée de la résistance électrique (tube en « U ») cerclée par une ailette thermique en forme de spirale. Il aurait été possible de remplacer la résistance électrique par un tube dans lequel circulerait un fluide caloporteur.

Bien entendu le domaine des appareils de chauffage ne se limite pas aux installations visibles dans les habitations particulières. Ces système servent également dans l'industrie, dès lors qu'il est nécessaire de chauffer un fluide. En effet, les ailettes ont pour rôle de favoriser les échanges thermiques entre un élément solide et un fluide. L'élément solide peut très bien être un tube dans lequel circule un second fluide, afin d'autoriser les échanges d'énergie sans pour autant mélanger ces derniers : c'est le principe des échangeurs de chaleur utilisés pour transmettre l'énergie entre plusieurs circuits de fluides caloporteurs.

Les ailettes thermiques peuvent aussi être nommées radiateurs. Leur but est alors de refroidir un élément, en transmettant l'excédent de chaleur au milieu extérieur, c'est à dire l'air dans la plupart des cas.



Le radiateur d'une voiture (image ci contre) permet de refroidir le moteur. Le liquide de refroidissement circule dans des tubes auxquels sont associées des ailettes thermiques qui transmettent cette chaleur à l'air. La circulation de l'air est assurée par la vitesse du véhicule, ce qui assure un phénomène de convection suffisant.

Les microprocesseurs des ordinateurs génèrent beaucoup de chaleur lors de leur fonctionnement. Afin d'éviter que ceux-ci soient endommagés par une surchauffe, ils sont parfois recouverts par un radiateur (image ci-contre). Le plus souvent en aluminium, ce système d'ailettes transmet directement la chaleur du processeur à l'air.

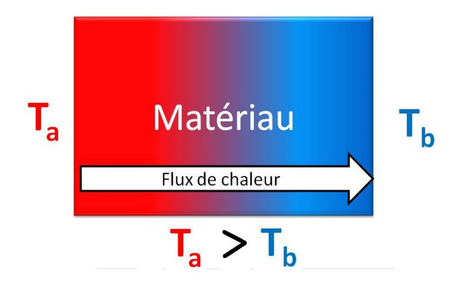


Ainsi, même si leur forme peut beaucoup varier, les ailettes thermiques sont indispensables pour améliorer le rendement de tout échangeur de chaleur. Que le but soit de refroidir un élément en transmettant sa chaleur à l'air ambiant, ou au contraire de chauffer un fluide grâce à une résistance électrique, le principe des échangeurs reste toujours le même, et des ailettes thermiques y sont presque toujours associées.



2.3. Modes de transferts thermiques

2.3.1. La conduction thermique :

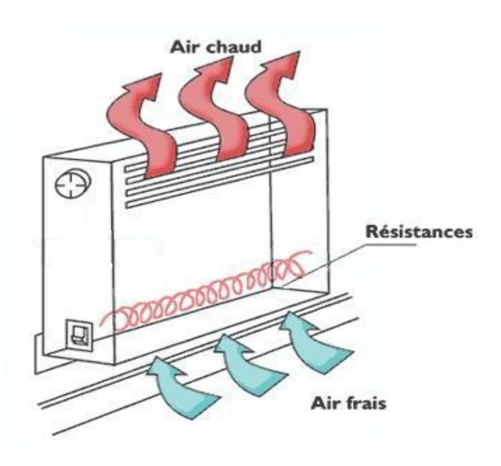


La conduction thermique est un transfert thermique ayant lieu au cœur d'un matériau c'est-à-dire à l'échelle microscopique. Elle résulte de l'élévation ou de la baisse de la température dans une certaine région d'un corps. Ceci provoque une différence de température dans l'intégrité du corps. Ainsi la région la plus froide du corps s'échauffe au contact de la région la plus chaude.

Ce transfert thermique a lieu sans transfert de matière mais avec transfert d'énergie. En effet, on peut considérer la conduction thermique au sein d'un solide comme la transmission de proche en proche de l'énergie microscopique de vibration du réseau cristallin. Car le fait que le corps soit chaud se traduit par une agitation microscopique des atomes composant le réseau cristallin.

Dans notre cas, lorsque l'extrémité de l'ailette est mise en contact avec le dispositif de chauffage, le phénomène de conduction thermique se traduit par une élévation progressive de la température dans la totalité de l'ailette et surtout dans les parties froides (l'autre extrémité).

2.3.2. La convection naturelle ou forcée :



La convection est un transfert thermique impliquant un déplacement de matière à l'échelle macroscopique (fluides et gaz).

Elle peut être naturelle et provenir d'une variation locale de température au sein même d'un fluide ou d'un gaz. En effet, cette variation provoque une baisse de la masse volumique de la « partie » la plus chaude du fluide ou du gaz. Ainsi cette « partie » s'élève et induit ce mouvement d'ensemble du fluide ou du gaz. (Vous pouvez voir ci-contre l'exemple du convecteur qui fonctionne selon ce principe de convection naturelle.)

Elle peut également être forcée afin d'accélérer les échanges thermiques, comme avec un ventilateur par exemple, ce que nous avons fait lors de nos expérimentations.

2.3.3. Le rayonnement :

Le rayonnement est un transfert thermique ne nécessitant pas de milieu matériel par opposition aux deux autres. En effet, ce type de transfert thermique résulte de l'émission de rayons électromagnétiques transportant de l'énergie. Ils sont émis par un corps chaud, tel que le soleil, et échauffent le corps qui les reçoit. (Ce type de transfert thermique ne nous a pas tellement concernés sachant que nous avons manipulé en salle de TD hors de vue du soleil.)



3. MÉTHODOLOGIE ET ORGANISATION DES TÂCHES

AILETTES THERMIQUES

Baptiste O'Jeanson
Antoine Salaun

Estelle Gervais
Christophe Bouvier

Réalisation des protocoles
expérimentaux

Modélisation de l'ailette thermique
Condition aux limites
Détermination de h

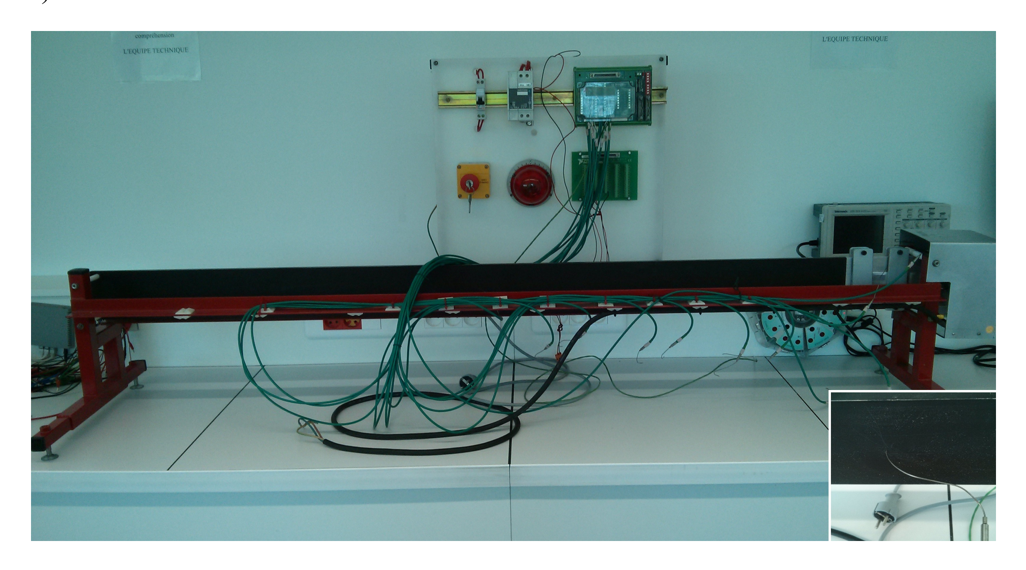
Analyse comparée

Conclusion

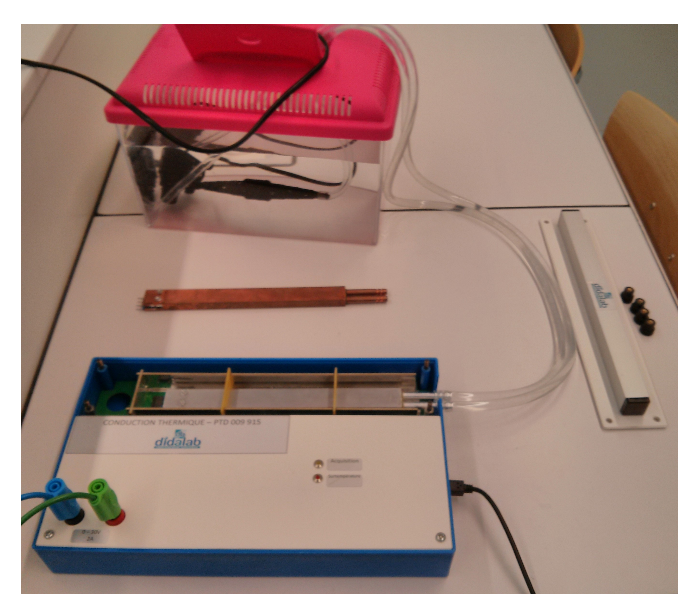
4. TRAVAIL EXPÉRIMENTAL

4.1. Présentation du matériel

Pour réaliser nos expériences, nous pensions au départ disposer d'une grande ailette (1,80 m) sur laquelle étaient installés des thermocouples tous les 10 cm. Ainsi on aurait pu réaliser des relevés de températures et en déduire la conduction du matériau pour la comparer à la conduction théorique (cf ci-après) .



Seulement, ce dispositif, obsolète informatiquement, dangereux et non réglable, s'est vu inutilisable. En effet, on ne disposait ni de régulateur de température ni de protection. De ce fait Mme. Duval nous a trouvé un dispositif expérimental « tout préparé » . En effet nous n'avons pas eu à commander les ailettes au département MECA, car elles étaient déjà conçues aux bonnes dimensions pour le dispositif de chauffage et de relevé des températures.



Ce dispositif se compose d'un boîtier de 30 cm sur 17 cm dans lequel on insère une des deux ailettes thermiques fournies (à savoir en cuivre ou en aluminium) de 17,4 cm de long. Cette ailette thermique est reliée via des composants électroniques au dispositif de chauffage par une extrémité et par l'autre au dispositif de refroidissement à eau. Elle est également en contact avec d'autres composants électroniques permettant de relever la température de l'ailette en temps réel : un capteur prend la température tous les 2,2 cm. Le boîtier peut être fermé avec une paroi/capuchon afin « d'isoler » l'ailette de l’extérieur.



Le dispositif de refroidissement est très simple, il s'agit d'un circuit à eau fermé. L'eau est pompée dans un « aquarium » et envoyée dans l'ailette via un tuyau. Elle ressort de l'ailette via un deuxième tuyau qui se déverse dans ce même aquarium. Ainsi, l'eau réalise ce cycle indéfiniment jusqu'à ce qu'on coupe la pompe.

Pour ce qui est du dispositif de chauffage, il est un peu plus compliqué à décrire car il s'agit de composants électroniques dont nous ignorons le nom et les fonctions. Cependant, l'ailette est reliée à une résistance chauffante via des « dents/pattes » qui s'insèrent dans le/les composants, lui/eux-même/s dans le boîtier. Ainsi quand on branche le boîtier au générateur, le courant permet à la résistance chauffante de chauffer l'ailette.

Le dispositif de relevé de température fonctionne grâce à des capteurs de température en contact avec l'ailette qui fonctionnent quand le boîtier est branché.

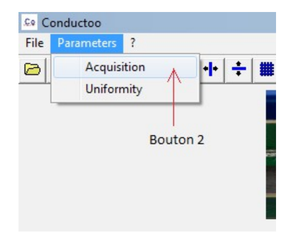


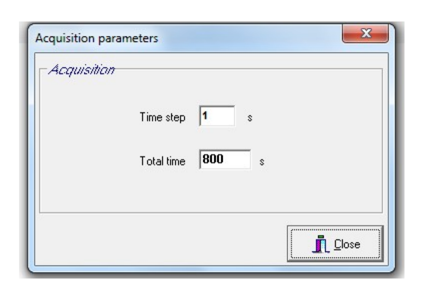
Enfin, pour pouvoir acquérir et visualiser quelque chose à l'ordinateur un logiciel, CONDUCTOO, nous a été fourni. Celui-ci permet de lancer une acquisition et d'obtenir les températures de l'ailette sur chacune de « ses parties » en fonction du temps.



4.2. Protocoles d'expériences

Le protocole général d'utilisation du dispositif (DIDALAB PTD 009 915) nous a été donné dans le manuel d'utilisation. Son utilisation se couple avec celle du logiciel CONDUCTOO, dont voici une capture d'écran :





En premier lieu il s'agit de connecter le dispositif à un ordinateur (USB). Une fois le logiciel démarré, on règle les paramètres d'acquisition (bouton 2) avant de la lancer (bouton 1). Ainsi, pour la période d'acquisition choisie, CONDUCTOO nous donne 8 courbes représentant les températures des 8 capteurs en fonction du temps.

Au fur et à mesure de nos expériences, nous nous sommes toutefois rendus compte de certaines « règles » d'utilisation complémentaires pas toujours spécifiées dans les documents fournis avec l'appareil.

- À partir d'une tension de 30V, le système est en surchauffe et l'acquisition s'arrête. Nous nous sommes donc limités, pour toute la durée du projet, à des études sous la barre des 25V.

- Entre deux acquisitions, il faut attendre que l'ailette refroidisse jusqu'à atteindre sa température initiale (au début de la première mesure), pour que les comparaisons entre deux acquisitions soient les plus fiables possible. Notons tout de même que l'étude théorique se résume à l'analyse de ces données en régime permanent, donc les premières secondes ne sont pas d'une grande importance pour la partie théorique.

- Pour l'ailette de cuivre, une tension supérieure à 5V est nécessaire pour obtenir des données exploitables. Pour une tension de l'ordre de 5V, le refroidissement à eau inhibe quasiment intégralement le chauffage.

- La durée moyenne des expériences est de 600 secondes. C'est la durée moyenne pour atteindre le régime permanent, mais cela varie en fonction du voltage que l'on utilise.

- Au niveau des règles de sécurité, il ne faut pas toucher l'ailette pendant ou après l'acquisition car celle-ci atteint parfois 100°C (toujours fonction du voltage).

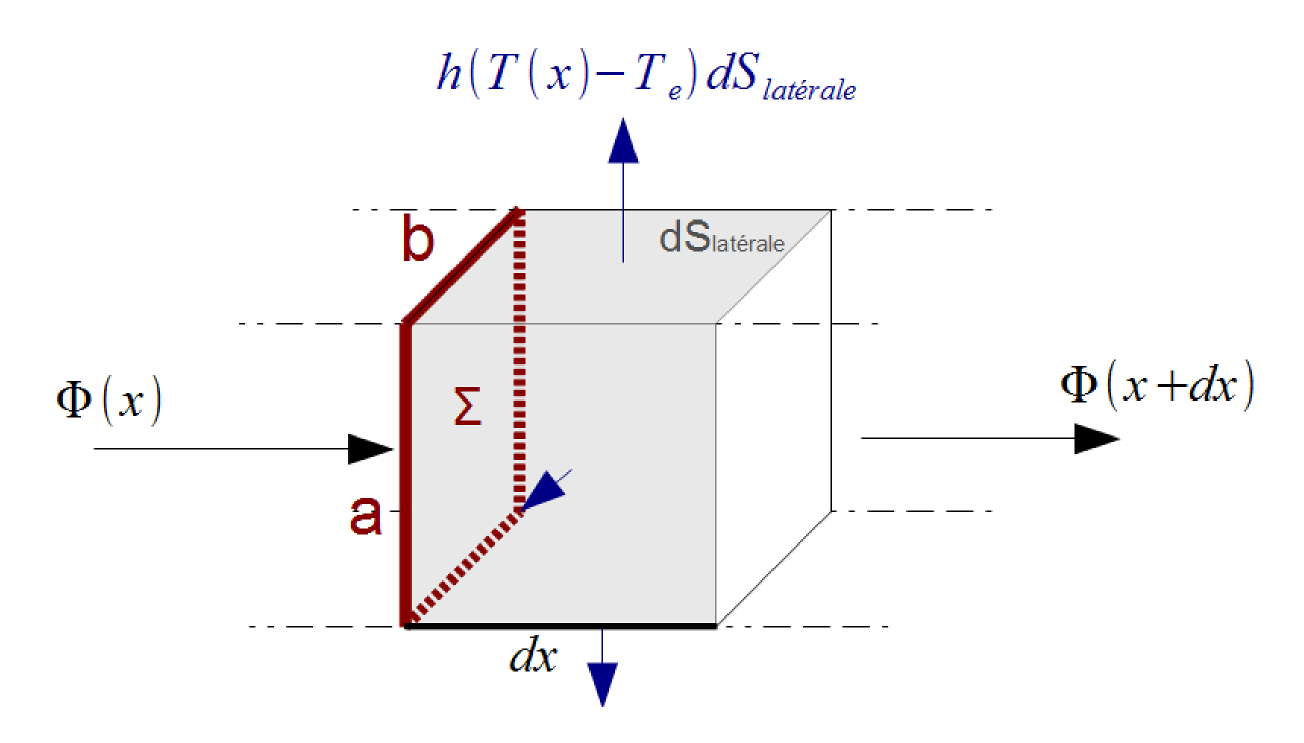


5. MODÈLE THÉORIQUE

5.1. Equation de l'ailette thermique

Il s'agit ici de déterminer une expression de $T(x,y,z,t)$. Cependant, en étudiant le transfert thermique dans l'ailette suivant une dimension et en régime stationnaire, cela revient à exprimer $T(x)$.

Pour cela, effectuons le bilan énergétique sur une tranche dx de solide, comprise entre les abscisses x et $x+dx$,entre t et $t+dt$, et ce, en régime permanent.



Bilan énergétique dans une portion d'ailette

Soit Φ la quantité d'énergie qui traverse la surface Σ pendant dt.

L'ailette présente, au niveau de sa surface en contact avec l'air, des pertes thermiques, par unité de temps et de surface, égales à :

$h(T(x)-T_e)$ où h : coefficient de transfert conducto-convectif

T_e : température ambiante

Il s'agit du phénomène de conducto-convection : les mouvements d'air entraînent une déperdition de la chaleur.



Bilan énergétique sur dx **entre** t **et** $t+dt$

$$\Phi(x)=\Phi(x+dx)+h(T(x)-T_e)dS_{latérale}$$

Or Φ est le flux du vecteur densité de courant thermique $\vec{j}_Q$ à travers Σ :
$$\Phi=\iint_{\Sigma} \vec{j}_Q(x).\vec{n}\,dS$$

Donc $j_Q(x)S=j_Q(x+dx)S+h(T(x)-T_e)Pdx$

avec P le périmètre mouillé, c'est-à-dire en contact avec le fluide qui est ici l'air.
($P=2(a+b)$)

$$\frac{-d\,j_Q}{dx}dx\,S=h(T(x)-T_e)Pdx$$

Or, d'après la loi de Fourier, pour une dimension : $j_Q=-\lambda\frac{dT}{dx}$ où λ est la conductivité thermique associée au matériau de l'ailette.

Donc $\lambda\frac{d^2T}{dx^2}S=h(T(x)-T_e)P$

$$\frac{d^2T}{dx^2}-\frac{hP}{\lambda S}(T(x)-T_e)=0$$ équation de l'ailette (1)

(1) $\Leftrightarrow$ $\frac{d^2T}{dx^2}-\frac{(T(x)-T_e)}{x_0^2}=0$ avec $x_0{}^2=\frac{\lambda S}{hP}$

x_0 étant homogène à une longueur : $[x_0^2]=\frac{\lambda S}{hP}=\frac{W.m^{-1}.K^{-1}.m^2}{W.m^{-2}.K^{-1}.m}=\frac{m}{m^{-1}}=m^2$

Après résolution, (1) donne: $T(x)=Ae^{-\frac{x}{x_0}}+Be^{\frac{x}{x_0}}+T_e$

Il reste donc à déterminer les constantes d'intégration à partir de conditions aux limites.



5.2. Conditions aux limites

5.2.1. Cas de notre expérience

$$T(x)=Ae^{-\frac{x}{x_0}}+Be^{\frac{x}{x_0}}+T_e \quad (1)$$

Soit L la longueur de l'ailette considérée.

● **Condition en** $x=L$: on pose $\boxed{T(x=L)=T_{finale}}$

T_{finale} correspond à la température réelle enregistrée en bout de l'ailette en régime permanent. Sa valeur sera donc donnée par les résultats expérimentaux.

Cette condition de température implique donc : $Ae^{-\frac{L}{x_0}}+Be^{\frac{L}{x_0}}+T_e=T_{finale}$

● **Condition en** $x=0$: il s'agit cette fois d'une condition portant sur la **continuité du flux thermique**.

On a : $j_Q(x)=-\lambda\frac{dT}{dx}=\frac{\Phi(x)}{S}$

Donc $\frac{dT}{dx}=-\frac{\Phi(x)}{\lambda S}$

On fait alors l'hypothèse que toute l'énergie fournie par la résistance chauffante est transmise à l'ailette, ce qui se traduit par : $\boxed{\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x=0}=-\frac{\Phi_0}{\lambda S}}$ avec Φ_0 le flux généré par la résistance.

(1) $\Rightarrow -\frac{A}{x_0}+\frac{B}{x_0}=-\frac{\Phi_0}{\lambda S}\Rightarrow -A+B=-\frac{\Phi_0}{\lambda S}x_0$

On résout le système : $Ae^{-\frac{L}{x_0}}+Be^{\frac{L}{x_0}}+T_e=T_{finale}$

$$-A+B=-\frac{\Phi_0}{\lambda S}x_0$$

Et on obtient : $$\boxed{B=\frac{1}{e^{\frac{L}{x_0}}+e^{\frac{-L}{x_0}}}\left(T_{finale}-T_e-\Phi_0\frac{x_0}{\lambda S}e^{\frac{-L}{x_0}}\right)}$$

$$\boxed{A=B+\Phi_0\frac{x_0}{\lambda S}}$$



Comme nous le verrons dans le VI, il est alors possible de tracer la courbe théorique de $T(x)$.

On peut noter que la valeur de Φ_0 n'est pas connue. Elle sera ajustée manuellement sur le tableur afin d'obtenir des modèles théoriques les plus proches possibles des résultats expérimentaux.

5.2.2. Remarques

Les conditions aux limites considérées dépendent des caractéristiques de l'ailette mais aussi de la configuration de l'expérience.

Comme nous l'avons mentionné précédemment (IV.1), en début de projet, nous avons commencé à travailler sur un banc d'essai thermique différent.

● Les conditions aux limites peuvent alors être les suivantes :

$\boxed{T(x=0)=T_0}$ où T_0 est la température imposée par la chaleur transmise par la résistance.

$\boxed{T(x\to\infty)=T(x\to L)=T_e}$ où T_e représente la température ambiante.

Il s'agit ici du **modèle de l'ailette infinie** : la dimension de l'ailette étant grande, on peut supposer que le transfert thermique induit par la résistance chauffante n'influe pas sur la température du bout de l'ailette.

Dans ce cas, on obtient : $\boxed{T(x)=(T_0-T_e)e^{-\frac{x}{x_0}}+T_e}$

● **Validité du modèle infini** : Ce modèle est valable lorsque $e^{\frac{L}{x_0}}\gg 1$.

Dans notre expérience nous avons par exemple : $L=0{,}174\,m$ et $x_0=1{,}24\,m$ dans le cas d'une convection naturelle interne pour une ailette en cuivre.

<u>Application numérique</u> : $e^{\frac{0{,}174}{1{,}24}}\approx 1{,}15$

Le modèle de l'ailette infinie n'est pas donc applicable dans ce cas.

● Pour vérifier ce modèle d'ailette infinie il est également possible d'imposer une condition de continuité du flux thermique, de la même façon que dans notre expérience, mais cette fois-ci en $x=L$, puisque la température en $x=0$ est déjà imposée par la résistance. Il s'agit en fait de « l'inverse » de notre expérience dans cette configuration.

Pour ce modèle fini on obtient :

$$\boxed{T(x)=(T_0-T_e)\left[ch\left(\frac{x}{x_0}\right)-\frac{th\left(\frac{L}{x_0}\right)+\frac{h\,x_0}{K}}{L+\frac{h\,x_0}{K}th\left(\frac{L}{x_0}\right)}sh\left(\frac{x}{x_0}\right)\right]+T_e}$$



5.3. Détermination du coefficient h

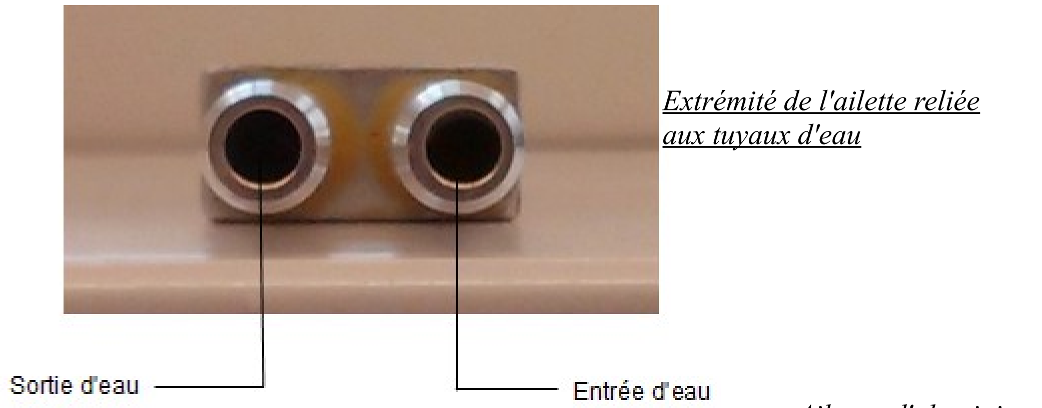
Afin de déterminer x_0 , il faut connaître la valeur du coefficient de transfert conducto-convectif h . Celle-ci dépend de la nature du fluide, de la température de celui-ci ainsi que du type d'écoulement.

5.3.1. Convection forcée interne de l'eau

Notre dispositif expérimental étant équipé d'un refroidissement à l'eau, nous devrions tenir compte de cette circulation permettant, a priori, de refroidir l'ailette. Une question s'est cependant posée : l'eau circule-t-elle dans toute l'ailette ou la barre est-elle pleine ?

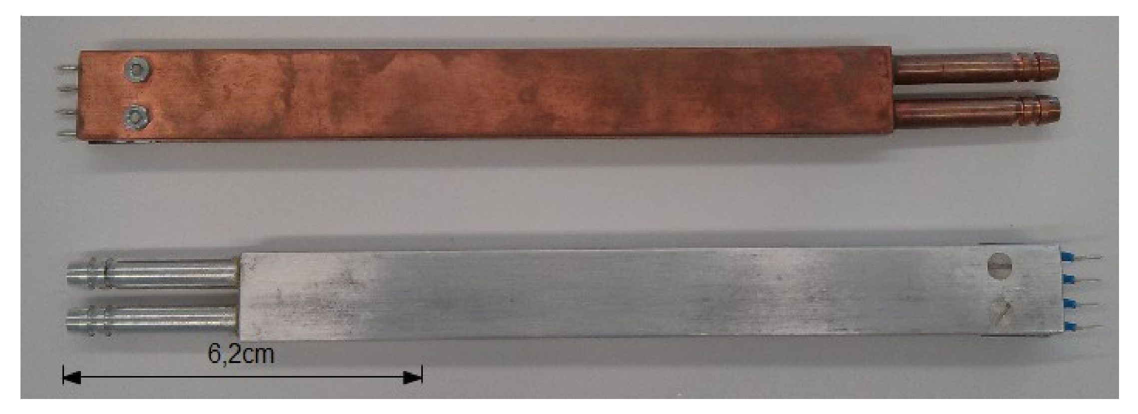
Pour y répondre nous avons cherché à mesurer le volume d'eau contenu dans l'ailette. Nous avons donc tout d'abord rempli la barre avec de l'eau, dans le but de peser cette masse d'eau et en déduire ensuite le volume. Il s'est avéré que seules quelques gouttes pénétraient dans la barre. Celle-ci devrait donc être pleine, excepté à l'extrémité.

Pour le vérifier, nous avons utilisé un fil d'étain que nous avons inséré dans une des entrées d'eau.



Extrémité de l'ailette reliée aux tuyaux d'eau

Ailettes d'aluminium et de cuivre



Le fil d'étain entre sur 6,2 cm dans l'ailette qui fait 17,4 cm. On en conclut que la circulation d'eau permet de refroidir l'extrémité de l'ailette seulement.

Dans ces conditions, nous faisons l'hypothèse que la convection forcée interne de l'eau est négligeable dans l'étude des transferts thermiques : elle permet seulement de maintenir le bout de l'ailette à température constante. Cette hypothèse sera vérifiée expérimentalement dans le VI.

5.3.2. Convection naturelle externe

Pour une convection naturelle de l'air : $h < 30 \quad W.m^{-2}.K^{-1}$ [1]

Nous pouvons nous attendre, dans le cas de notre expérience, à une valeur de h faible car l'air est confiné dans le boîtier : les mouvements d'air sont donc peu importants et le phénomène de conducto-convection est limité.

Afin d'avoir une valeur plus précise de h , qui intervient dans l'expression de $T(x)$, nous sommes passés par le nombre de Rayleigh. Il s'agit d'un nombre adimensionné utilisé en mécanique des flux caractérisant le transfert de chaleur au sein d'un fluide.

$$\boxed{Ra_\delta = \frac{g\beta(T_c - T_f)\delta^3}{\alpha\nu}}$$

- $g = 9{,}8\, m.s^{-2}$: constante gravitationnelle
- Hypothèse : l'air est assimilé à un gaz parfait.

D'où $\beta = \frac{1}{T}$: coefficient de dilatation thermique isobare.

avec $T = T_e = 300\text{K}$

- $T_c - T_f \approx 20\, K$ (cf. courbes expériementales VI.1) il s'agit de la différence de température entre les extrémités de l'ailette, une fois le régime permanent atteint.
- $\delta \approx 1 \quad cm$: épaisseur de la couche d'air dans le boîtier.
- $\alpha_{air} = \frac{\lambda_{air}}{\rho_{air} c_{air}}$: diffusivité thermique de l'air

[2]On a $\lambda_{air} = 0{,}0262\, W.m^{-1}.K^{-1}$: conductivité thermique de l'air.

$\rho_{air} = 1{,}293\, kg.m^{-3}$: masse volumique de l'air.

$c_{air} = 1004\, J.K.kg^{-1}$: capacité thermique massique de l'air.

- $\nu_{air} = 15{,}6.10^{-6}\, m^2.s^{-1}$: viscosité de l'air.

L'application numérique donne $Ra_\delta \approx 2075$

On a alors $\lambda_e = 0.059 \quad Ra_\delta^{0{,}4} \lambda_{air}$ et $h = \frac{\lambda_e}{\delta}$ $\Rightarrow$ $\boxed{h \approx 3}$

Comme nous nous en doutions, la valeur de h est faible.

1 *Transferts thermiques*, Jean Taine *et al*, Dunod
2 wikipedia.fr/Air



6. ANALYSES ET COMPARAISONS

6.1. Modèle théorique et expérience lors d'une convection naturelle :

Comme précisé dans la partie théorique de ce rapport, la convection naturelle correspond aux transferts d'énergie entre l'ailette thermique et un fluide qui est au repos. Cette convection peut être soit interne, soit externe. Le terme « interne » est utilisé dans le cas ou le fluide en question est confiné dans un espace réduit, tandis que le mot « externe » indique qu'un grand volume est disponible.

Afin de tester la validité de la modélisation théorique expliquée précédemment, nous avons confronté celle-ci avec les résultats obtenus expérimentalement. Sont représentées ci-dessous les courbes théoriques et expérimentales de la température en fonction de la distance sur l'axe principal de l'ailette par rapport à la résistance chauffante, pour deux ailettes de matériaux différents (cuivre et aluminium).

Température en fonction de la distance à l'origine de l'ailette
(résistance alimentée à 15V et 0,9A)



Ici, on se trouve dans le cas d'une convection naturelle interne, l'air au contact de l'ailette thermique étant au repos, mais confiné dans un boîtier. Le bout de l'ailette est refroidi par un courant d'eau, ramenant ainsi sa température à celle de l'eau, proche de celle de l'air de la pièce. Une des conditions limites utilisées pour le modèle expérimental est donc que la température au bout de l'ailette est fixée à la température mesurée expérimentalement en ce point. La seconde condition limite est une égalité des flux à l'origine de l'ailette, au niveau de la résistance chauffante. Les courbes expérimentales ne sont pas définies sur l'intégralité de la longueur de l'ailette à cause de l'absence de capteurs de température aux extrémités de l'ailette.

Le graphique obtenu montre bel et bien une décroissance comparable entre courbes théoriques et expérimentales de la température avec l'écartement de la source de chaleur. Malgré tout, une différence de plus en plus important à mesure que l'on s'écarte du bout de l'ailette nous force à nous pencher sur les causes possibles d'erreurs. Le modèle théorique utilise un grand nombre d'hypothèses, comme vu précédemment. Le coefficient h (coefficient de transfert thermique de surface, ou conducto-convectif), de par son calcul complexe peut s'avérer imprécis. De plus, les conductivités thermiques choisies pour l'aluminium et le cuivre (K ou λ , exprimées en $W.m^{-1}.K^{-1}$, pris à 390 pour le cuivre et à 236 pour l'aluminium) ne sont pas vérifiables facilement, or la pureté des matériaux composants les ailettes peuvent les faire varier. Enfin, notre modèle théorique utilise un coefficient Φ/S pour la condition limite d'égalité des flux à l'origine. Celui-ci a été défini de manière à se rapprocher au maximum des deux courbes expérimentales, autrement dit, si la courbe correspondant à l'aluminium comporte une erreur (sur λ par exemple), cette erreur se répercutera sur celle du cuivre. De plus, en appliquant cette méthode, nous faisons l'hypothèse que l'énergie apportée à l'extrémité que nous prenons comme origine de chaque ailette est la même, or les ailettes utilisées avaient chacune une résistance électrique fixée. Une différence de puissance entre les deux résistances ou un contact électrique de moins bonne qualité pourraient expliquer les différences qui apparaissent sur les graphes.

6.2. Influence du refroidissement à eau et du type de convection :

Afin de vérifier la validité de certaines de nos hypothèses, où l'existence de phénomènes que le modèle théorique laissait présager, nous avons étudié les différences entre les courbes ci-dessous. Toutes montrent là encore l'évolution de la température en fonction de la distance entre le point d'étude et l'origine de l'ailette, là où est placée la résistance chauffante.

Le matériau de l'ailette utilisée pour ces différents relevés de température est le cuivre. La tension aux bornes de la résistance chauffante est de 20V pour tous les relevés, tension menant à une intensité de 0,6A. Le principal but de cette série d'expérience est de montrer l'influence du type de convection sur la température de l'ailette en régime stationnaire. La mention « circulation d'eau » de la légende correspond au fonctionnement de la pompe du refroidissement à eau qui passe au bout de celle-ci, tandis que « ventilateur » indique l'utilisation d'un ventilateur de 25W afin d'exposer l'ailette à un souffle d'air constant. Il est important de ne pas tomber dans le piège de comparer directement l'efficacité des refroidissements à eau et à air : n'oublions pas que seul le second a une influence sur l'ensemble du système, tandis que le courant d'eau a seulement pour but de fixer la température du bout de l'ailette.

Température en fonction de la distance à l'origine de l'ailette
(résistance alimentée à 20V et 0,6A)

Theta (°C)

65
60
55
50
45
40
35
30
25
20
15

0 0,02 0,04 0,06 0,08 0,1 0,12 0,14 0,16 0,18

X(m)

◆ Circulation d'eau et ventilateur
◆ Ventilateur seul
◆ Circulation d'eau seule

Il apparaît que ce système de refroidissement à eau ne suffit pas à maintenir l'extrémité de l'ailette à température ambiante (c'est à dire ici à la température de l'air du laboratoire qui est environ la même que celle de l'eau du circuit de refroidissement). En effet, les courbes jaune et bleue montrent un écart significatif de près de 10°C en leur dernier point. Ce constat montre que l'hypothèse utilisée dans le modèle théorique consistant à considérer une température fixe en bout d'ailette quelque soit le matériau et le coefficient conducto-convectif n'est utilisable que lors de comparaisons d'ailettes dans des conditions où ces variables restent dans le même ordre de grandeur.

7. CONCLUSION

Nous arrivons au terme de ce dossier et il est temps de dresser le bilan de l'étude que nous avons menée. Nous avons réussi en partie seulement les objectifs que nous nous étions fixés au début de ce projet. Nous n'avons pas pu effectuer de comparaisons de l'efficacité des ailettes thermiques en fonction de leur forme à cause du matériel de type éducatif que nous avons utilisé qui ne permet qu'un nombre limité d'expérimentation, mais nous avons néanmoins réussi à comparer l'influence du matériaux et de l'environnement (type de convection) sur la température le long de celles-ci. La modélisation informatique de cette évolution de température a elle aussi été en partie effectuée : nous avons créé une feuille de calcul fonctionnelle pour la convection naturelle, mais donnant des résultats irréalistes dans le cas de la convection forcée (voir annexe).

Une chose est sûre : ce projet nous aura permis à tous de découvrir et de comprendre des notions importantes de thermodynamique, notamment les différences entre les phénomènes de conduction et de convection. Le travail fourni lors de la conception de la modélisation fait également appel aux notions de flux, importantes dans un grand nombre de domaines de la physique. Bien-sûr, les apports de ce projet ne sont pas les même pour tous les membres du groupe. Voici ci-dessous nos conclusions à titre personnel :

Estelle :

Souhaitant m'orienter vers le département énergétique et propulsion, j'avais choisi le sujet « Ailettes thermiques » afin d'en apprendre plus sur les transferts thermiques et surtout, d'un point de vue plus concret. Concernant les aspects théorie et modélisation du projet sur lesquels je me suis concentrée, cela n'a pas été évident au début : n'ayant pas vraiment de connaissances préalables sur le sujet, il a fallu se former à de nouvelles notions telles que la conduction, même si nous étions déjà familiers avec les calculs de bilan énergétique ou de flux par exemple.

Bien que nous nous étions fixés des objectifs lors des premières séances, je ne voyais alors pas vraiment comment nous y arriverions. Finalement il est apparu que le projet se construisait et s'orientait « tout seul » en fonction du matériel que nous avions à disposition et des difficultés que nous rencontrions au fur et à mesure. Aussi nous n'avons pas atteint exactement tous nos objectifs mais nous avons par ailleurs pu étudier des aspects que nous n'avions même pas envisagés en début de projet : par exemple, lorsque nous avons abandonné le banc d'essai thermique d'1m80 pour passer au dispositif scolaire, Christophe et moi n'avions pas pensé à changer les conditions aux limites de l'équation de l'ailette. Il nous a fallu un certain temps pour réaliser notre erreur et c'est seulement à ce moment que j'ai compris comment ces conditions aux limites permettent de caractériser notre expérience dans la modélisation théorique.

Je trouve assez dommage de n'avoir pu aller plus loin dans le projet par manque de temps. Cependant, le bilan pour moi est positif de par l'intérêt du projet et la bonne entente du groupe, qui n'était pas prévisible puisque nous n'avions jamais travaillé ensemble.

Christophe :

Le projet de P6 aura été une bonne expérience dans l'ensemble. Je regrette parfois que certains de nos cours ne soient pas plus illustrés d'exemples d'applications concrètes, essentielles pour comprendre et s'intéresser à un sujet. Ce projet va dans le sens inverse : nous partons d'un problème expérimental puis nous pouvons le comparer avec le modèle théorique que nous adaptons au fur et à mesure à notre situation. C'est une démarche qui sort de nos habitudes, et c'est ce qui rend la P6 intéressante.

J'aurais aimé que nous puissions faire un plus grand nombre d'expériences pour améliorer notre modélisation de l'ailette thermique, néanmoins le travail effectué m'a déjà permis d'améliorer

mes connaissances en thermodynamique, domaine que je rencontrerais à nouveau si j'entre dans le département EP. Le fait de continuer d'apprendre à travailler en groupe, de manière plus indépendante que précédemment et avec une certaine latitude dans la direction que peut prendre notre projet est également très positif.

Baptiste :

Au sortir du 3ème semestre STPI de l'INSA, mon ressenti vis à vis de certaines matières concernant la physique, telle que la thermodynamique, s'était totalement altéré par rapport à mes propres convictions en arrivant à l'INSA. En effet je pensais faire le département MECA ou éventuellement EP en arrivant à l'INSA. Mais l'expérience P1 et T1 m'ayant vraiment déplu par le fait d'apprendre une quantité de concepts totalement « obscures » quant à leurs utilités, j'ai choisi de m'orienter vers le département ASI.

Cependant ne voulant pas partir sur une note trop noire concernant ce domaine physique, j'ai choisi de réaliser ce projet de P6 sur les ailettes thermiques. Ainsi cela m'a permis de mieux comprendre tout les concepts abstraits et de pouvoir les apprécier à leur juste valeur. Car le fait de pouvoir, dans un même projet, mêler théorie et pratique restera, à mes yeux, le meilleur moyen de comprendre pourquoi la thermodynamique a été conçu d'une manière si abstraite, alors qu'il s'agit d'un domaine de la physique, et bien sur de comprendre ce phénomène de conducto-convection. J'ai eu la chance pour cela de travailler au sein d'un groupe où régnait une ambiance de travail très chaleureuse (ce qui est super quand on s'intéresse à des phénomènes de transferts thermiques) qui m'a permis de m'occuper avec Antoine de la partie pratique qui me plaisait davantage. Ainsi j'ai pu mieux saisir l'utilité qu'ont les ailettes thermiques.

Je ressors donc de ce projet avec une idée très positives du travail de groupe, ainsi qu'avec l'idée que la thermodynamique est un domaine très intéressant, mais qui ne me fera pas changer d'avis quant à mon orientation pour autant. Ma seule déception vis à vis du projet, qui fut une déception globale du groupe, est que l'on ait pas pu concevoir nous même les ailettes afin de pouvoir comparer leur efficacité en fonction de leur forme, de leur taille...

Antoine :

Comme Baptiste, je n'ai pas choisi le sujet ailettes thermiques par affinité particulière avec l'enseignement de physique proposé lors des trois premiers semestres, mais plutôt pour varier le contenu de mon emploi du temps de quatrième semestre. Ayant choisi la thématique ASI/GM, la pratique expérimentale et la physique en général se sont faites rares.

C'est d'ailleurs ce caractère « appliqué » qui rend la matière intéressante selon moi, et c'est pourquoi j'ai préféré me concentrer sur le travail expérimental avec Baptiste. Sans aller jusqu'à dire que les manipulations étaient particulièrement intéressantes, elles m'ont clairement permis de mieux appréhender notre problème et nos objectifs au fur et à mesure des séances. Cela se couple avec un autre aspect fondamental du projet qui est le travail en groupe : par exemple, Estelle et Christophe qui s'occupaient de l'étude théorique nous ont plusieurs fois demandé des mesures supplémentaires, ou bien un certain « traitement » des donnés pour mieux coller à leur travail (comme par exemple donner la température en fonction du temps plutôt qu'en fonction de la position du capteur le long du dispositif…). Ainsi la P6 s'inscrit réellement comme un travail collectif, ce qui est d'autant plus appréciable qu'il s'agit (depuis les TPE et encore) de notre première expérience sérieuse de travail en groupe. C'est donc une expérience agréable et formatrice à mon sens.

Une part d'étonnement cependant quant au matériel à disposition, qui du point de vue expérimental n'était pas toujours propice à des mesures exsangues d' « approximations » (par exemple ventilateur domestique peu maniable et encombrant, interstice d'air entre l'ailette et les capteurs dans le dispositif Didalab …). Rien de vraiment compromettant pour le projet cependant, mais parfois du temps perdu à essayer de bricoler tel ou tel dispositif. Je suis d'accord avec Christophe et Baptiste en

ce qui concerne une possible « coopération » avec le département MECA qui peut être intéressante à intégrer dans le contenu du projet.

Comme indiqué précédemment, le sujet des ailettes thermiques est trop vaste pour être traité en si peu de temps par un groupe. En effet, de nombreux points pourraient être améliorés dans une étude future. Un banc de test autorisant l'utilisation d'ailettes thermiques de formes et de matériaux variables, créées au département MECA par exemple, permettrait de mieux caractériser l'influence des caractéristiques de l'ailette sur ses propres performances. Le modèle théorique pourrait lui aussi être amélioré, en intégrant le calcul du coefficient de transfert conducto-convectif (noté h) par exemple, et en corrigeant les erreurs qui adviennent dans le cas d'une convection forcée. Utiliser ensuite ces outils pour créer l'ailette la plus efficace possible suivant un cahier des charges précis en terme de coût et d'encombrement pourrait être un objectif intéressant pour un autre projet.



8. BIBLIOGRAPHIE

Livres :

VU « Inventions et technologies » Dictionnaire complet des grandes inventions, *Gallimard*

L2 « Larousse universel en 2 volumes » dictionnaire encyclopédique, *Larousse*

Taine Jean *et al*, “Transferts Thermiques”, *Dunod*

Hprépa “Thermodynamique” 2nde année PC-PC* PSI-PSI*, *Hachette*

Sites internet (valables au 15/06/13) :

http://www.bepita.net/materiels/generalites/principes_thermodynamiques.pdf

http://fr.wikipedia.org/wiki/Phlogistique

http://fr.wikipedia.org/wiki/Transfert_thermique

http://www.acteurdurable.org/chauffage-decentralise.html (Image convecteur)

http://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Rayleigh

http://fr.wikipedia.org/wiki/Diffusivit%C3%A9_thermique

http://fr.wikipedia.org/wiki/Air

http://www-lpmcn.univ-lyon1.fr/~sanmigue/teaching/Thermodynamique/thermo11.pdf



9. ANNEXES

9.1. Formulaire

• Grandeurs

Φ : flux thermique (W)

h : coefficient de transfert conducto-convectif $(W.m^{-2}.K^{-1})$

$\vec{j}_Q$: vecteur densité de courant $(W.m^{-2})$

et $\Phi=\iint_{\Sigma} \vec{j}_Q(x).\vec{n}\,dS$ (flux de $\vec{j}_Q$ à travers une surface Σ)

λ : conductivité thermique du corps $(W.m^{-1}.K^{-1})$

$\beta=\frac{1}{T}$: coefficient de dilatation thermique isobare pour un gaz parfait (K^{-1})

ρ : masse volumique $(kg.m^{-3})$

c : capacité thermique massique $(J.K.kg^{-1})$

ν : viscosité cinématique $(m^2.s^{-1})$

α : diffusivité thermique $(m^2.s)$

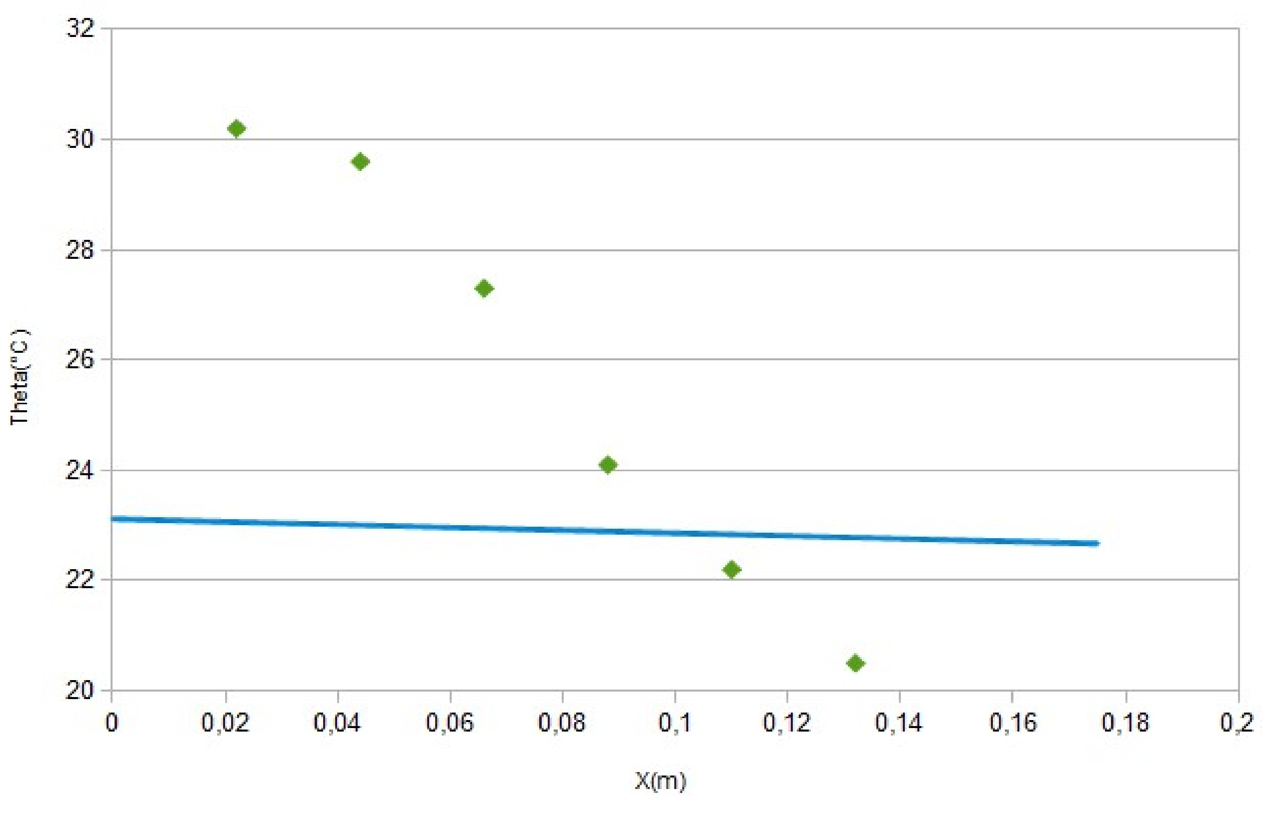
• Formules

Loi de Fourier : $\vec{j}_Q=-\lambda\,\vec{grad}\,(T)$

Nombre de Rayleigh : $Ra_\delta=\frac{g\beta(T_c-T_f)\delta^3}{a\nu}$



9.2. Courbe dans le cas de la convection forcée



Cette courbe de la température de l'ailette à mesure que l'on s'écarte de la résistance chauffante montre que notre modélisation ne fonctionne pas dans le cas d'une convection forcée, c'est à dire avec un coefficient conducto-convectif élevé. Nous n'avons pas trouvé les raisons exactes de ce mauvais fonctionnement.